

## ΠΥΚΝΩΤΕΣ

**Εισαγωγή**

Οι πυκνωτές είναι οι διατάξεις που αποθηκεύουν ηλεκτρικό φορτίο. Η δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου από ένα πυκνωτή εξαρτάται από τη χωρητικότητα του. Βασικά ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο αγωγούς που ανάμεσα τους υπάρχει μονωτικό υλικό. Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από το σχήμα των οπλισμών, τα γεωμετρικά του στοιχεία και το μονωτικό υλικό που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς του.

Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως στα συντονιζόμενα κυκλώματα, στα ηλεκτρονικά φίλτρα, στα συστήματα ανάφλεξης των αυτοκινήτων και για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η **κατανόηση** των ιδιοτήτων των πυκνωτών και του τρόπου που συνδέονται σε ένα κύκλωμα.

## 7-1. Χωρητικότητα αγωγού

Τα φορτία κατανέμονται στην επιφάνεια του αγωγού με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα σημεία της επιφάνειας του αγωγού να έχουν το ίδιο δυναμικό. Το δυναμικό αυτό ονομάζεται *δυναμικό αγωγού*.

□ Χωρητικότητα αγωγού ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του φορτίου που φέρει ο αγωγός προς το δυναμικό του αγωγού.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (7.1)$$

Μονάδα χωρητικότητας στο S.I είναι το 1Farad.  $\left(1F = 1 \frac{Cb}{V}\right)$

Το 1F είναι πολύ μεγάλη μονάδα χωρητικότητας. Η Γη για παράδειγμα έχει χωρητικότητα μικρότερη από 1F. Για το λόγο αυτό στη πράξη χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια του 1F, όπως το 1mF ( $10^{-3}$  F), το 1μF ( $10^{-6}$  F), το 1nF ( $10^{-9}$  F) και το 1pF ( $10^{-12}$  F).

Η χωρητικότητα ενός αγωγού εξαρτάται από:

- Από το σχήμα και τα γεωμετρικά στοιχεία του αγωγού.
- Από τη φύση του υλικού μέσα στο οποίο βρίσκεται ο αγωγός.
- Από την παρουσία άλλων αγωγών.

Πρέπει να τονισθεί, πως η χωρητικότητα αγωγού είναι ανεξάρτητη τόσο από το φορτίο του αγωγού, όσο και από το δυναμικό του. Ο λόγος αυτών των μεγεθών είναι σταθερός, δηλαδή αν μεταβληθεί το φορτίο θα μεταβληθεί και το δυναμικό έτσι ώστε ο λόγος τους να έχει σταθερή τιμή.

## 7-2. Χωρητικότητα πυκνωτή

Η χωρητικότητα των αγωγών είναι μικρή. Η απαίτηση για μεγαλύτερες χωρητικότητες οδήγησε στο να δημιουργηθούν συστήματα δύο αγωγών που έχουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα και ονομάζονται *πυκνωτές*. Οι δύο αγωγοί που αποτελούν τον πυκνωτή ονομάζονται *οπλισμοί* και όταν ο πυκνωτής είναι φορτισμένος φέρουν ίσο κατά μέτρο φορτίο αλλά με αντίθετο πρόσημο.

□ Χωρητικότητα πυκνωτή ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του φορτίου που φέρει ο πυκνωτής προς τη διαφορά δυναμικού των οπλισμών του.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (7.2)$$

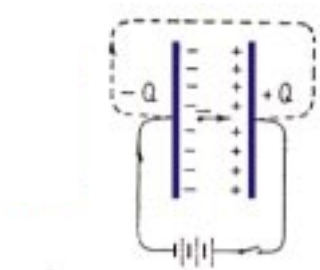
Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται:

- Από το σχήμα των οπλισμών και τα γεωμετρικά στοιχεία του πυκνωτή.
- Από τη φύση του υλικού που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς του.

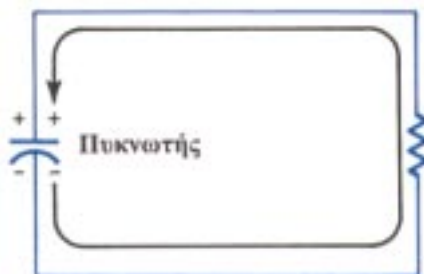
Ανάλογα με το σχήμα των οπλισμών τους, οι πυκνωτές διακρίνονται σε επίπεδους, σφαιρικούς, κυλινδρικούς κ.α.

Ανάλογα με το *διηλεκτρικό*, το οποίο υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς διακρίνονται σε ηλεκτρολυτικούς, χάρτου, κεραμικούς, μίκας κ.λ.π.

Σε ένα κύκλωμα οι πυκνωτές χρησιμεύουν για να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς. Για να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια οι πυκνωτές πρέπει να τροφοδοτηθούν με τάση, ώστε να φορτιστούν. Μόλις οι οπλισμοί συνδεθούν με τους πόλους μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ελεύθερα ηλεκτρόνια από τον οπλισμό που είναι συνδεδεμένος με τον θετικό πόλο (θετικός οπλισμός) δια μέσου της ηλεκτρικής πηγής πηγαίνουν στον οπλισμό που είναι συνδεδεμένος με τον αρνητικό πόλο. Η μετατόπιση αυτή συνεχίζεται έως ότου η τάση στους οπλισμούς του πυκνωτή γίνει ίση με την τάση στους πόλους της πηγής. Τελικά στο θετικό οπλισμό υπάρχει έλλειμμα ηλεκτρονίων επομένως αυτός έχει θετικό φορτίο, ενώ ο αρνητικός οπλισμός, στον οποίο υπάρχει περίσσια ηλεκτρονίων, έχει αρνητικό φορτίο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *φόρτιση* του πυκνωτή.



**Σχήμα 7.1.** Κύκλωμα φόρτισης πυκνωτή



**Σχήμα 7.2.** Κύκλωμα εκφόρτισης πυκνωτή

Όταν ο πυκνωτής αποσυνδεθεί από την πηγή εξακολουθεί να είναι φορτισμένος, αν όμως οι οπλισμοί του συνδεθούν με αγωγό, τότε ηλεκτρόνια από τον αρνητικό οπλισμό δια μέσω του αγωγού μετατοπίζονται στον θετικό οπλισμό με αποτέλεσμα τη βαθμιαία μείωση του φορτίου των οπλισμών. Η μετατόπιση των ηλεκτρονίων συνεχίζεται μέχρις ότου το φορτίο των οπλισμών τελικά μηδενισθεί. Η όλη διαδικασία ονομάζεται *εκφόρτιση* του πυκνωτή.

### 7-2.1. Χωρητικότητα επιπέδου πυκνωτή

□ **Επίπεδος πυκνωτής** είναι ο πυκνωτής, του οποίου οι οπλισμοί είναι επίπεδες μεταλλικές πλάκες.

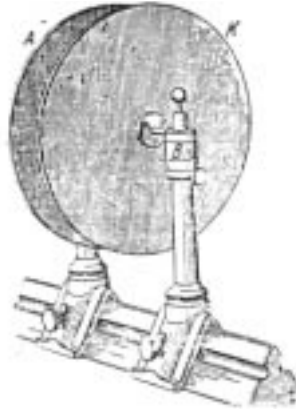
Η χωρητικότητα πυκνωτή που έχει επίπεδους οπλισμούς δίνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\ell} \quad (7.3)$$

όπου  $S$  το εμβαδόν των οπλισμών,  $\ell$  η μεταξύ τους απόσταση και  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

Όπως εύκολα συνάγεται από τη σχέση (7.3), η χωρητικότητα ενός επιπέδου πυκνωτή αυξάνεται όταν αυξάνεται το εμβαδόν των οπλισμών του και όταν μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση.

Σημειώνεται πως οι οπλισμοί ενός πυκνωτή μπορούν να έχουν οποιοδήποτε επίπεδο σχήμα. Στο σχήμα 7-3 εικονίζεται πυκνωτής, του οποίου οι οπλισμοί είναι κύκλοι.



**Σχήμα 7.3.** Επίπεδος πυκνωτής με κυκλικούς οπλισμούς

### 7-2.2. Ενέργεια πυκνωτή

Για να φορτιστεί ένας πυκνωτής πρέπει να καταναλωθεί ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή υπό μορφή ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου. Η ενέργεια αυτή δίνεται από τις σχέσεις:

$$W = \frac{1}{2} Q V \quad (7.4)$$

$$W = \frac{1}{2} C V^2 \quad (7.5)$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (7.6)$$

όπου  $Q$  το φορτίο των οπλισμών,  $V$  η τάση του πυκνωτή και  $C$  χωρητικότητα. Οι τρεις σχέσεις είναι ισοδύναμες αφού κάθε μια μπορεί να προκύψει από τις άλλες με τη βοήθεια της σχέσης  $Q=CV$ .

### 7-3. Διηλεκτρική σταθερά

Έχει διαπιστωθεί, πως αν μεταξύ των οπλισμών πυκνωτή παρεμβληθεί, μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) αυξάνεται η χωρητικότητα. Η αύξηση της χωρη-

τικότητας ποικίλει ανάλογα με το διηλεκτρικό και εξαρτάται από τη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού.

□ Διηλεκτρική σταθερά υλικού ονομάζεται το σταθερό πηλίκο της χωρητικότητας  $C$  πυκνωτή, που ανάμεσα στους οπλισμούς του υπάρχει διηλεκτρικό, προς τη χωρητικότητα  $C_0$  του ίδιου πυκνωτή, όταν ανάμεσα στους οπλισμούς του υπάρχει κενό ή αέρας.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (7.7)$$

### 7-3.1. Διηλεκτρική αντοχή

Το διηλεκτρικό, που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς πυκνωτή, είναι μονωτής και συνεπώς δεν παρουσιάζει αγωγιμότητα. Όμως από τα άτομα όλων των υλικών είναι δυνατόν να αποσπασθούν ηλεκτρόνια, όταν αυτά βρεθούν μέσα σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Αν αυτό συμβεί, τότε το διηλεκτρικό τρυπάει από το ρεύμα ενός σπινθήρα. Η συμπεριφορά ενός διηλεκτρικού περιγράφεται από την διηλεκτρική αντοχή.

□ Διηλεκτρική αντοχή ενός υλικού ονομάζεται η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να ανεχθεί το υλικό, χωρίς να καταστραφεί από ηλεκτρικό σπινθήρα.

Στους πυκνωτές για να επιτευχθούν μεγάλες χωρητικότητες χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν λεπτότερα φύλλα διηλεκτρικού υλικού. Επειδή η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στους οπλισμούς αυξάνεται, όταν αυξάνεται η τάση, ο πυκνωτής δεν μπορεί να φορτιστεί σε τάση μεγαλύτερη από αυτήν που δημιουργεί ένταση μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική αντοχή του διηλεκτρικού. Η μέγιστη τάση λειτουργίας ενός πυκνωτή αναγράφεται απαραίτητα δίπλα στη χωρητικότητά του.

## 7-4. Συνδεσμολογία πυκνωτών

Οι πυκνωτές του εμπορίου έχουν χωρητικότητες που έχουν συγκεκριμένες τιμές. Για τις ανάγκες μιας εφαρμογής είναι δυνατόν να απαιτούνται χωρητικότητες που οι τιμές τους δεν υπάρχουν στο εμπόριο, γι' αυτό συνδέονται

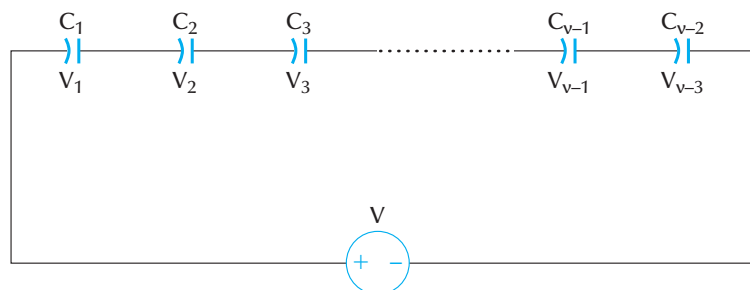
πυκνωτές με τέτοιο τρόπο, ώστε η χωρητικότητα που παρουσιάζει το σύστημα να έχει την απαιτούμενη τιμή. Η χωρητικότητα αυτή ονομάζεται *ολική χωρητικότητα*, δηλαδή:

❑ **Ολική ή ισοδύναμη χωρητικότητα συνδεσμολογίας (συστήματος) πυκνωτών** ονομάζεται η χωρητικότητα ενός πυκνωτή, που όταν στους οπλισμούς του υπάρχει η ίδια τάση που υπάρχει στα άκρα της συνδεσμολογίας, αποκτά το ίδιο φορτίο με το φορτίο της συνδεσμολογίας.

❑ **Φορτίο συνδεσμολογίας** ονομάζεται το φορτίο που περνάει από το εσωτερικό της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί τη συνδεσμολογία, ώστε να φορτιστούν πλήρως οι πυκνωτές της.

#### 7-4.1. Συνδεσμολογία πυκνωτών σε σειρά

Στη συνδεσμολογία αυτή οι πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, ώστε ο δεξιός οπλισμός του ενός πυκνωτή να είναι συνδεδεμένος με τον αριστερό οπλισμό του επόμενου και δεν υπάρχει ανάμεσά τους σημείο λήψης.



**Σχήμα 7.4.** Συνδεσμολογία πυκνωτών σε σειρά

Για να φορτιστούν οι πυκνωτές της συνδεσμολογίας που φαίνεται στο σχήμα 7-4 φορτίο  $-q$  μετακινείται από τον αριστερό οπλισμό του  $C_1$  και μέσα από την πηγή πηγαίνει στο δεξιό οπλισμό του  $C_v$ , οπότε όλοι οι ενδιάμεσοι οπλισμοί φορτίζονται εξ επαγωγής. Επομένως όλοι οι πυκνωτές έχουν το ίδιο φορτίο  $q$ , που είναι και το ολικό φορτίο της συνδεσμολογίας, αφού για να φορτιστούν οι πυκνωτές μέσα από την πηγή πέρασε φορτίο  $q$ . Άρα:

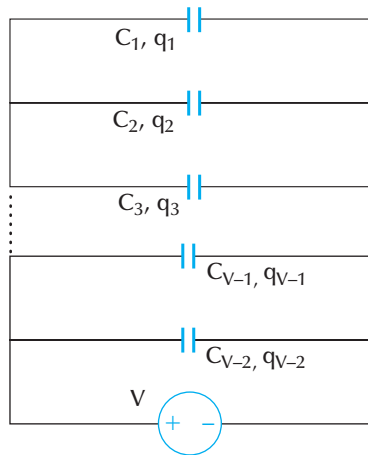
$$C_{0\lambda} = \frac{q}{V} \Rightarrow C_{0\lambda} = \frac{q}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_v} \Rightarrow \frac{1}{C_{0\lambda}} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_v}{q} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{C_{0\lambda}} = \frac{V_1}{q} + \frac{V_2}{q} + \frac{V_3}{q} + \dots + \frac{V_v}{q} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{C_{0\lambda}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_v} \quad (7.8)$$

### 7-4.2. Παράλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών

Σε μια παράλληλη συνδεσμολογία, οι πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι με τους ομώνυμους σπλισμούς τους και επομένως έχουν την ίδια τάση που είναι ίση με τη τάση της πηγής. Αν οι πυκνωτές είναι φορτισμένοι αντίστοιχα με φορτία  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_v$ , το ολικό φορτίο είναι  $q_{0\lambda} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_v$ . Επομένως:



**Σχήμα 7.5.** Παράλληλη σύνδεση πυκνωτών

$$C_{0\lambda} = \frac{q_{0\lambda}}{V} \Rightarrow C_{0\lambda} = \frac{q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_v}{V} \Rightarrow$$

$$C_{0\lambda} = \frac{q_1}{V} + \frac{q_2}{V} + \frac{q_3}{V} + \dots + \frac{q_v}{V} \Rightarrow$$

$$C_{0\lambda} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_v \quad (7.9)$$



## 7-5. Εφαρμογές

### Εφαρμογή 1η

Πυκνωτής έχει χωρητικότητα  $C=2,2\mu\text{F}$  και είναι φορτισμένος σε τάση  $V=20\text{V}$ . Να υπολογισθεί το φορτίο του.

#### Λύση

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{q}{V} \Rightarrow q = CV \Rightarrow q = 2,2\mu\text{F} \cdot 20\text{V} = 44 \mu\text{C}.$$

### Εφαρμογή 2η

Οι οπλισμοί επιπέδου πυκνωτή απέχουν κατά  $\ell=0,1\text{mm}$ . Αν η χωρητικότητά του πυκνωτή είναι  $C=0,177\text{nF}$ , ποιο είναι το εμβαδόν των οπλισμών του;

$$\text{Δίνεται } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}.$$

#### Λύση

Η χωρητικότητα επιπέδου πυκνωτή σε συνάρτηση με τα γεωμετρικά του στοιχεία είναι:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\ell} \Rightarrow C\ell = \epsilon_0 S \Rightarrow S = \frac{C\ell}{\epsilon_0} \Rightarrow S = \frac{0,177 \cdot 10^{-9} \text{ F } 10^{-4} \text{ m}}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}} = 0,002 \text{ m}^2.$$

### Εφαρμογή 3η

Επίπεδος πυκνωτής έχει χωρητικότητα  $C=1,2\text{nF}$ . Ο πυκνωτής συνδέεται με τους πόλους πηγής τάσης  $V=20\text{V}$ . Ακολουθώς οι οπλισμοί του πυκνωτή αποσυνδέονται από την πηγή και η απόστασή τους τετραπλασιάζεται. Να υπολογιστούν:

- α) Η νέα χωρητικότητα.  
 β) Το νέο φορτίο του πυκνωτή.  
 γ) Η νέα τάση του πυκνωτή.  
 δ) Η νέα ενέργεια του πυκνωτή.

### Λύση

α) Η χωρητικότητα του πυκνωτή μετά την απομάκρυνση των οπλισμών του είναι:

$$\left. \begin{array}{l} C' = \epsilon_0 \frac{S}{\ell'} \\ \ell' = 4\ell \end{array} \right\} \Rightarrow C' = \epsilon_0 \frac{S}{4\ell} \quad (1)$$

Η αρχική χωρητικότητα του πυκνωτή είναι:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\ell} \quad (2)$$

Από τη διαίρεση των σχέσεων (1) και (2) έπεται:

$$\frac{C'}{C} = \frac{\epsilon_0 \frac{S}{4\ell}}{\epsilon_0 \frac{S}{\ell}} = \frac{1}{4} \Rightarrow C' = \frac{1}{4} C \Rightarrow C' = \frac{1}{4} 1,2 \text{ nF} = 0,3 \text{ nF}.$$

β) Όταν απομακρύνονται οι οπλισμοί δεν είναι δυνατόν να μετακινηθεί φορτίο από τον έναν οπλισμό στον άλλο. Επομένως το νέο φορτίο του πυκνωτή είναι ίσο με το αρχικό δηλαδή:

$$q' = q = CV \Rightarrow q' = 1,2 \text{ nF} \cdot 20 \text{ V} = 24 \text{ nC}.$$

γ) Η νέα τάση του πυκνωτή είναι:

$$V' = \frac{q'}{C'} \Rightarrow V' = \frac{24 \text{ nC}}{0,3 \text{ nF}} = 80 \text{ V}.$$

δ) Η νέα ενέργεια του πυκνωτή είναι:

$$W' = \frac{1}{2} \frac{q'^2}{C'} \Rightarrow W' = \frac{1}{2} \frac{(24 \cdot 10^{-9} \text{ C})^2}{0,3 \cdot 10^{-9} \text{ F}} = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ J}.$$